



Optimisation des Pertes par Commutation dans un Convertisseur Modulaire Multiniveaux (MMC)

Ahmed Islam Zama, David Frey, Abdelkrim Benchaib, Seddik Bacha, Bruno Luscan, S. Silvant

► To cite this version:

Ahmed Islam Zama, David Frey, Abdelkrim Benchaib, Seddik Bacha, Bruno Luscan, et al.. Optimisation des Pertes par Commutation dans un Convertisseur Modulaire Multiniveaux (MMC). Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361560

HAL Id: hal-01361560

<https://hal.science/hal-01361560>

Submitted on 7 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation des Pertes par Commutation dans un Convertisseur Modulaire Multiniveaux (MMC)

A. Zama¹, D. Frey^{1,2}, A. Benchaib¹, S. Bacha^{1,2} B. Luscan¹ and S. Silvant¹

¹ SuperGrid Institute SAS, 130 Léon Blum, 69611 Villeurbanne, France

² Université Grenoble Alpes-Laboratoire G2Elab, 21 avenue des Martyrs, 38031 Grenoble, France
ahmedislam.zama@supergrid-institute.com

RESUME -Les pertes dans une liaison à courant continu à haute tension sont un facteur pénalisant (4000 €/kW sur une durée de 30 ans). L'inconvénient vient des structures de type Onduleur de tension qui ont des pertes élevées (1.8%) relativement aux structures à base de thyristors. L'arrivée des convertisseurs de type Modulaires Multiniveaux (MMC) a permis de réduire ces pertes à 1%. Cet avantage permet d'envisager une forte utilisation de cette structure dans des applications HVDC. Le but de ce travail est d'étudier le contrôle bas niveau de ce convertisseur qui correspond au choix des sous-modules à utiliser et à l'équilibrage des condensateurs afin de minimiser la fréquence de commutation. En se focalisant sur un contrôle de type ondulation des tensions des sous modules, une amélioration a été apportée via une réduction de la fréquence de commutation moyenne de ces sous-modules. Des simulations sous MATLAB/Simulink ont été conduites et ont permis de valider la méthode proposée.

Mots-clés— *Convertisseur Modulaire Multiniveaux (MMC), Contrôle, Équilibrage de tension, Pertes par commutation.*

1. INTRODUCTION

Grâce aux derniers développements en électronique de puissance, notamment dans le domaine des composants semi-conducteurs contrôlables, les onduleurs de tension de type VSC (Voltage Source Converter) sont en pleine expansion dans les applications de type HVDC [1]. La plus part de ces applications sont basées sur des structures à deux voire trois niveaux. Pour cela, une connexion en série de centaines des semi-conducteurs est nécessaire afin de supporter le niveau de la tension DC. D'autres structures multiniveaux sont présentées dans la littérature, néanmoins leur utilisation pour des applications HVDC est compliquée à cause de la complexité du contrôle (commutation instantanée des IGBTs connectés en série, gestion de modes dégradés...). Ainsi, le convertisseur type Modulaire Multiniveau (MMC) semble être un bon candidat pour les futurs projets HVDC [1]. Proposée initialement par Marquardt [2], cette structure comporte de nombreux avantages notamment en termes de pertes (rendement meilleur par rapport à d'autres structures).

En plus du contrôle vectoriel classique appliqué sur une structure de type 2 niveaux, contrôle du flux de puissance et de la tension DC, le contrôle du MMC est équipé d'un autre étage qui a pour mission d'équilibrer les tensions des condensateurs situés dans les sous modules (SMs). Ce contrôleur est connu sous le nom BCA acronyme anglais de « Balancing Control

Algorithm ». Différents contrôleurs sont présentés dans la littérature : BCA à fréquence de commutation réduite [3], BCA à fréquence de commutation réduite et équilibrage amélioré [4], BCA à base d'une tolérance autour de la valeur moyenne et BCA à base d'une tolérance autour de la valeur nominales [5].

Les deux premières méthodes travaillent avec des fréquences de commutations très basses en changeant l'état d'un seul SM par cycle. Cela introduit une ondulation des tensions des sous modules importante qui peut atteindre 30% de la valeur nominale. Pour les deux dernières, l'ondulation des tensions est contrôlée indirectement par un paramètre de réglage qui s'appelle « paramètre de tolérance ». Par contre, ces méthodes peuvent introduire des fréquences de commutation très élevées si le paramètre de tolérance est mal réglé. Ce papier présente une amélioration du fonctionnement du BCA à base d'une tolérance autour de la valeur moyenne dans le but de réduire la fréquence de commutation des interrupteurs tout en gardant une ondulation des tensions constantes.

Ce papier est organisé comme suit : la topologie des convertisseurs type MMC est présentée dans la section 2. Le contrôleur d'équilibrage de tension et l'équilibrage basé sur l'ondulation de tension sont expliqués dans les sections 3 et 4 respectivement. Dans la section 4, le BCA proposé est présenté avec son diagramme de contrôle. Enfin, des simulations sont réalisées afin de confirmer la validité de la méthode proposée.

2. ARCHITECTURE ET MODE DE FONCTION

Les structures MMC appartiennent à la famille des onduleurs multi-niveaux série. Proposée originalement par [2], cette structure d'électronique de puissance est présentée sur la *Figure 1*. Elle est composée de N Sous-Modules (SMs) par demi-bras connectés en série, ce regroupement de plusieurs sous-modules forme une tension modulée par demi-bras. Chaque sous-module contient deux IGBTs avec leurs diodes en antiparallèles et un condensateur. La commande de ces IGBTs permet de connecter ou de déconnecter le condensateur sur le réseau afin de former la tension modulée. Des inductances L_{arm} sont rajoutées en série dans chaque demi-bras afin de raccorder les deux sources de tension ensemble, contrôler et filtrer le courant de circulation. Pour une application en HVDC, elles servent aussi à limiter la vitesse d'évolution du courant lors de défauts.

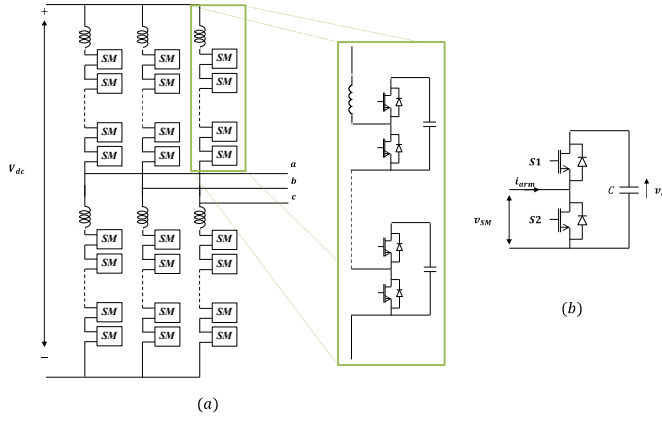


Figure 1: (a) MMC topology, (b) Half-Bridge SM

3. EQUILIBRAGE DE TENSION DES SMS

Le contrôle-commande du convertisseur MMC peut être décomposé en deux parties : le contrôle haut niveau (appelé aussi contrôle global ou éloigné) et le contrôle bas niveau (appelé aussi contrôle rapproché ou BCA acronyme anglais de Balancing Control Algorithm) *Figure 2*. Dans le présent travail, on ne s'intéressera qu'au contrôle bas niveau dont nous expliquerons le principe.

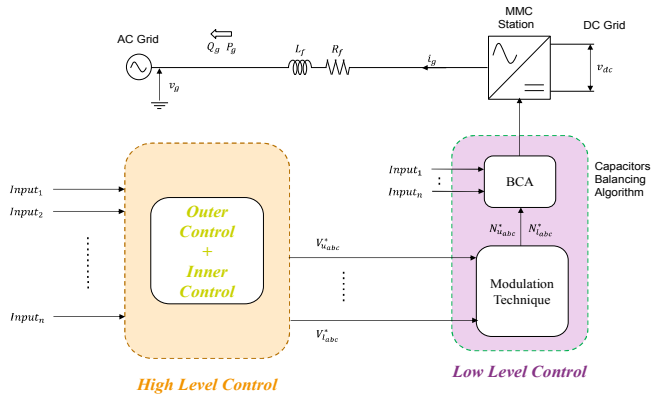


Figure 2: Schema de contrôle d'un convertisseur type MMC

Le contrôle bas niveau a pour objectif de générer les signaux de commande pour chaque SM afin d'équilibrer et de limiter les ondulations de tensions des condensateurs à des valeurs acceptables. Les contrôles par sélection des SMs sont appliqués séparément pour chaque demi-bras. Toutes les méthodes appliquées se basent sur le sens du courant et sur le tri des tensions des SMs (voir *Figure 3*).

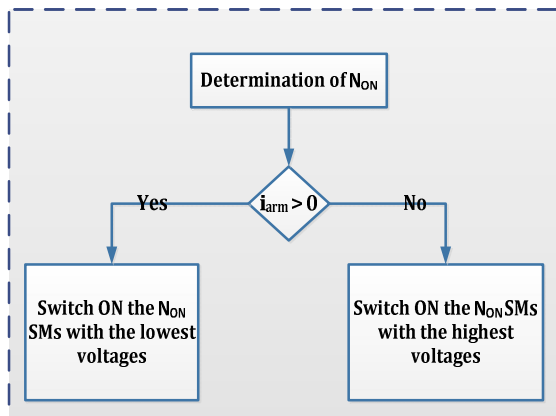


Figure 3: L'organigramme du premier BCA pour un MMC proposé par [2].

Si on souhaite insérer des SMs : si le courant du demi-bras est positif, les SMs avec les condensateurs les moins chargés (c.à.d. avec les tensions les plus petites) vont être choisis car un courant positif dans le SM aura pour effet d'augmenter leurs tensions. Et de même, si le courant est négatif, ceux avec les condensateurs les plus chargés seront insérés pour les décharger.

Si on souhaite désactiver des SMs : si le courant du demi-bras est positif, les SMs avec les condensateurs les plus chargés (c.à.d. avec les tensions les plus grandes) vont être choisis. Et si le courant est négatif, ceux avec les condensateurs les moins chargés seront désactivés.

Les méthodes d'équilibrage de tensions peuvent être classées en deux catégories : **Equilibrage basé sur la fréquence de commutation** et **Equilibrage basé sur l'ondulation de tension**. Ces deux méthodes sont présentées et comparées dans [6]. Dans la suite de ce travail on ne s'intéresse qu'au BCAs basé sur l'ondulation de tension.

4. EQUILIBRAGE BASE SUR L'ONDULATION DE TENSION

Le point particulier de ce type d'équilibrage est son degré de liberté, utilisé pour régler l'ondulation de la tension des SMs. Cette fonction est assurée en utilisant un paramètre de réglage qui représente la tolérance. Cela permet d'obtenir une fluctuation adéquate des tensions des condensateurs des SMs tout en maintenant un nombre de commutations assez bas [5].

Son principe de fonctionnement (voir *Figure 4*) est proche de celui présenté dans la section précédente, la différence se situe au niveau de la fréquence à laquelle le classement des tensions est réalisé.

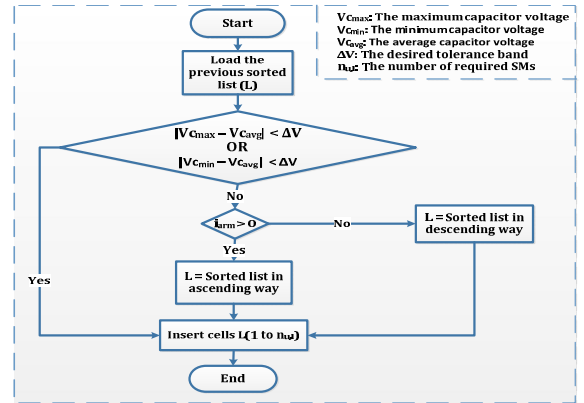


Figure 4: L'organigramme d'équilibrage des tension basé sur l'ondulation de tension

Dans cette méthode, le classement des tensions ne se fait que si nécessaire grâce à l'entrée du paramètre de réglage de la tolérance autour de la valeur moyenne. Cela permet d'autoriser une fluctuation des tensions par rapport à leur valeur moyenne sans dépasser les limites fixées par le paramètre de tolérance réglé.

Cette méthode a été testée en simulation sur un MMC avec 20 SMs et avec une tolérance de 5%, les tensions des SM sont présentées dans *Figure 5*. Les fréquences de commutation des interrupteurs présentées dans le *Tableau 1* ont été calculées sur une simulation d'une seconde en régime établie.

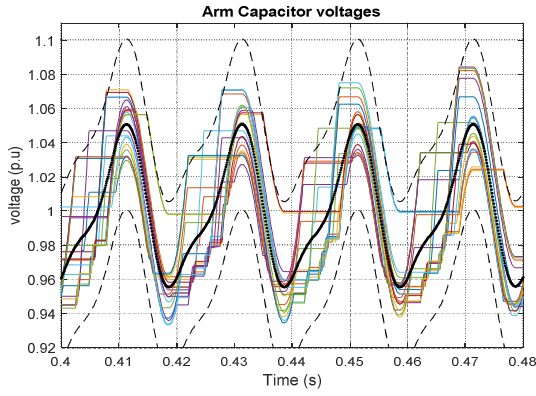


Figure 5: Variation des tensions des SMs

Tableau 1: La fréquence de commutation calculée pour les 20 SMs

Active power		0.3 p.u
Ondulation (%)		11.2
Fréquence de commutation (Hz)	Moy	149
	Max	170
	Min	130

5. OPTIMISATION DES PERTES PAR COMMUTATION

Les Figure 6-7 montrent la relation entre la puissance échangée, le paramètre de tolérance, l'ondulation et la fréquence de commutation respectivement. Le fait d'utiliser un paramètre de tolérance constant comme présenté dans [5] va imposer une ondulation des tensions et une fréquence de commutation constantes Figure 8.

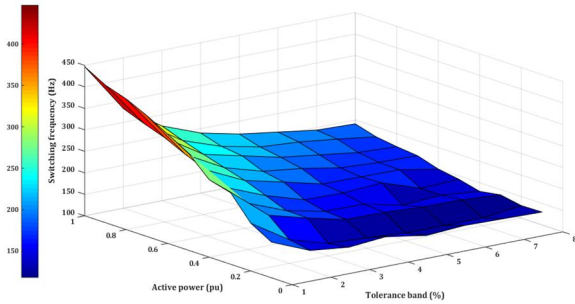


Figure 6: Variation de la fréquence de commutation en fonction de la puissance et de la tolérance

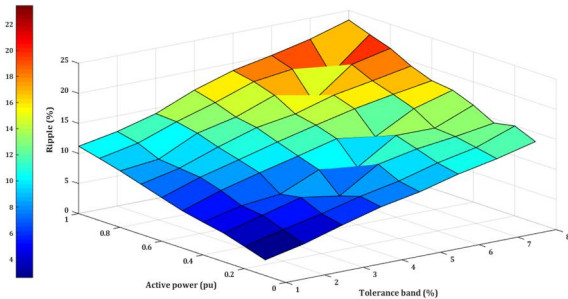


Figure 7: Variation de l'ondulation de tension en fonction de la puissance et de la tolérance

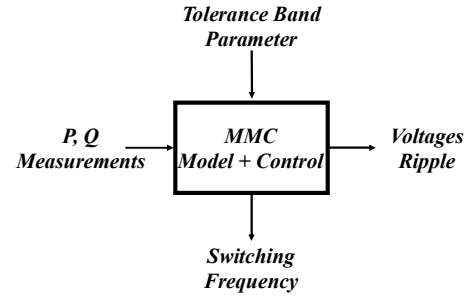


Figure 8: Logique imposée par le BCA présentée dans [5]

Du point de vue du contrôle, ce qui nous intéresse c'est l'ondulation des tensions et la fréquence de commutation qui a un rapport direct avec les pertes par commutations. L'idée est d'ajouter un degré de liberté en plus à cette méthode de contrôle en imposant une ondulation de tension maximale et en faisant varier la tolérance en temps réel. La variation de la tolérance permet d'élargir la plage de variation de la fréquence de commutation, cela permet de faire travailler le MMC avec des fréquences de commutation optimisées selon la puissance échangée tout en gardant la même ondulation des tensions.

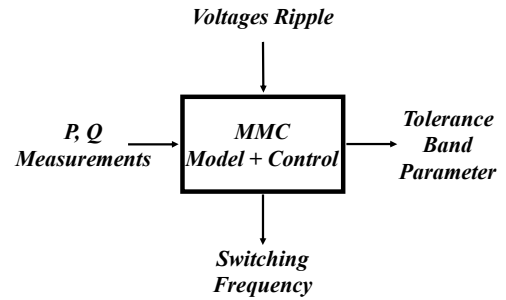


Figure 9: Logique imposée par le BCA proposé

Le BCA proposé aura donc comme entrées (voir Figure 10) : le nombre des SMs à insérer, la mesure des tensions des SMs, le courant du demi-bas et le paramètre de tolérance qui sera calculé en temps réel selon les caractéristiques Figure 6-7. Ces caractéristiques dépendent fortement des paramètres de la station MMC notamment la valeur des condensateurs.

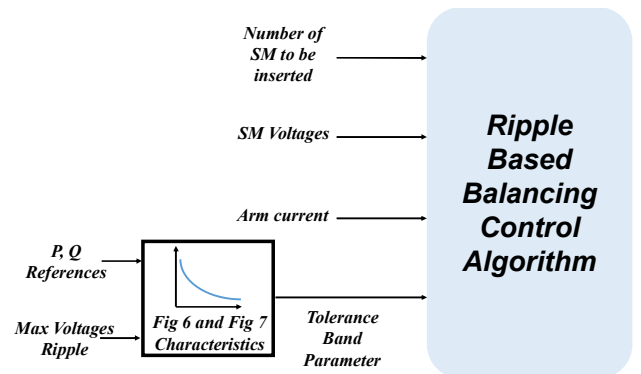


Figure 10: Schema de contrôle pour le BCA proposé

6. SIMULATION

Afin de tester la méthode proposée d'équilibrage de tension à base d'ondulation de tension, le modèle semi-analytique d'un MMC [7] avec 20 SMs a été conçu avec le BCA proposé sous Matlab-Simulink. La station est connectée à des sources DC et AC parfaites.

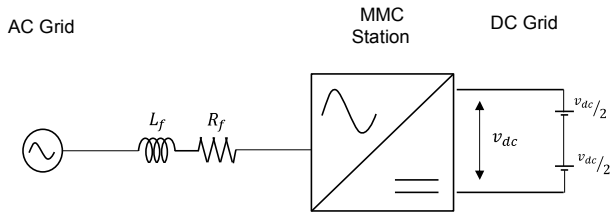


Figure 11: Circuit de simulation utilisé

Durant la simulation, les références des contrôleurs d'énergies sont maintenues à 1 p.u. L'ondulation maximale de la tension imposée par le BCA est de 11%. L'événement à tester est une série d'échelons de puissance active:

- A $t = 0$ s : elle passe de 0 à 0.6 p.u.
- A $t = 0.2$ s : elle passe de 0.6 à 0.3 p.u.
- A $t = 0.4$ s : elle passe de 0.3 à 0.9 p.u.

Les résultats de simulations sont présentés dans les Figure 12, 12 et 13.

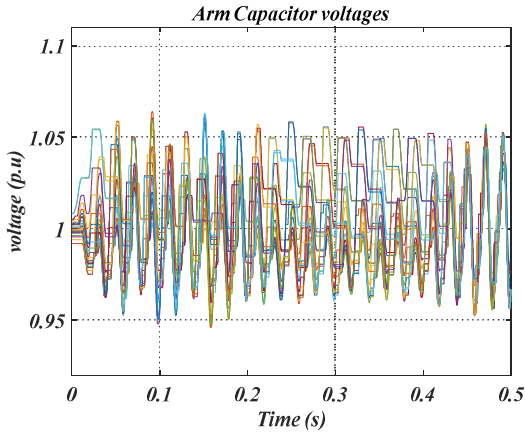


Figure 12: La variation des tensions des SMs pour la phase 1

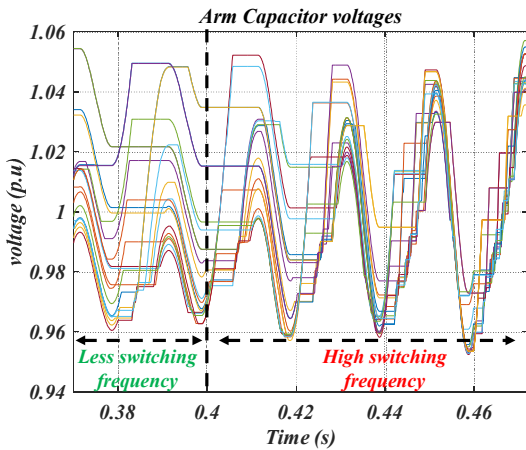


Figure 13: Zoom sur les tension des SMs

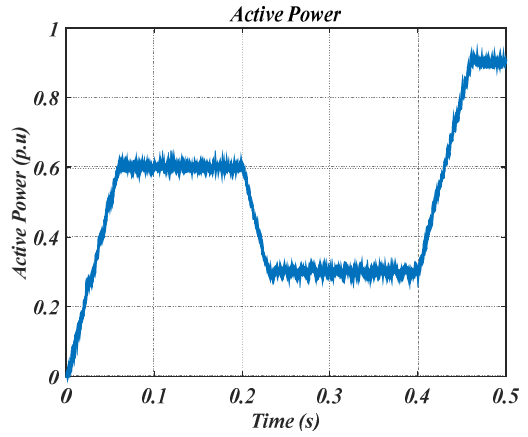


Figure 14: La variation de la puissance active

Les tensions des sous-modules sont présentées dans la Figure 12. Comme on peut le constater, le BCA utilisé permet de garder l'ondulation de tension inférieure à la valeur imposée comme entrée (11%) avec différents niveaux de puissance échangés. La Figure 13 (zoom sur les tensions) montre que la fréquence de commutation des interrupteurs change selon le niveau de puissance transféré, le BCA permet de faire fonctionner le MMC avec des fréquences de commutation très basses (100-150 Hz) pour des faibles puissances (0.3 p.u) et des fréquences moyennes avec des fortes puissances (0.9 p.u), ce qui permet de réduire les pertes par commutations dans le MMC (rendement meilleur).

Tableau 2: La fréquence de commutation calculée avec le BCA proposé

Active power		0.3 p.u	0.6 p.u	0.9 p.u
Ondulation (%)		10.5	10.8	10.93
Fréquence de commutation (Hz)	Moy	121	186	342
	Max	147	213	373
	Min	104	151	302

Un autre point très important, à ne pas négliger, concerne la valeur des condensateurs qui joue un rôle important dans l'ondulation des tensions. Un surdimensionnement de sa valeur réduit l'ondulation naturelle des tensions, donc permet une augmentation de la valeur du paramètre de tolérance ce qui conduit à réduire la fréquence de commutation. Pour cela, une analyse coût-bénéfice (Pertes par commutation / Dimensionnement des SMs) est nécessaire afin de bien dimensionner la valeur des condensateurs.

Tableau 3: La fréquence de commutation avec une augmentation de 40% de la valeur des condensateurs

Active power		0.3 p.u	0.6 p.u	0.9 p.u
Ondulation (%)		10.68	10.81	10.95
Fréquence de commutation (Hz)	Moy	96	135	199
	Max	111	148	218
	Min	86	125	182

7. CONCLUSIONS

Cet article propose une nouvelle méthode d'équilibrage de tension afin d'optimiser les pertes par commutation. Cette fonctionnalité est réalisée en faisant varier un paramètre de réglage qui dépend de la puissance échangée au niveau du MMC. Des simulations sous MATLAB/Simulink ont été conduites et ont servi à confirmer la validité de la méthode proposée. Les résultats obtenus peuvent être pris en compte dans le dimensionnement des MMC avec une analyse coût-bénéfice (Pertes par commutation / Dimensionnement des SMS).

8. REFERENCES

- [1] Petit, M., Bacha, S., Guillaud, X., Morel, H., Planson, D., & Raison, B. "Les réseaux HVDC multi-terminaux: des défis multiples en génie électrique," *In Symposium de Génie Électrique (2014, July)*.
- [2] Lesnicar, A., & Marquardt, R. (2003, June). "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range." *In Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna (Vol. 3, pp. 6-pp). IEEE*.
- [3] Tu, Q., Xu, Z., & Xu, L. (2011). "Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters," *In power Delivery, IEEE Transactions on, 26(3), 2009-2017*.
- [4] Saad, H., Guillaud, X., Mahseredjian, J., Denetiere, S., & Nguefeu, S. (2015). "MMC Capacitor Voltage Decoupling and Balancing Controls," *In power Delivery, IEEE Transactions on, 30(2), 704-712*.
- [5] Hassanpoor, A., Angquist, L., Norrga, S., Ilves, K., & Nee, H. P. (2015). Tolerance band modulation methods for modular multilevel converters. *In power Electronics, IEEE Transactions on, 30(1), 311-3*.
- [6] Zama, A., Ait mansour, S., Frey, D., Benchaib, A., & Bacha, S., "A Comparative Assessment of Different Balancing Control Algorithms for Modular Multilevel Converter (MMC)", *In press, the 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2016), Sept. 2016, conference location: Karlsruhe*
- [7] Zama, A., Bacha, S., Benchaib, A., Frey, D., and Silvant, S, "A Novel Modular Multilevel Converter Modelling Technique Based on Semi-Analytical Models." *In international Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (2016)*